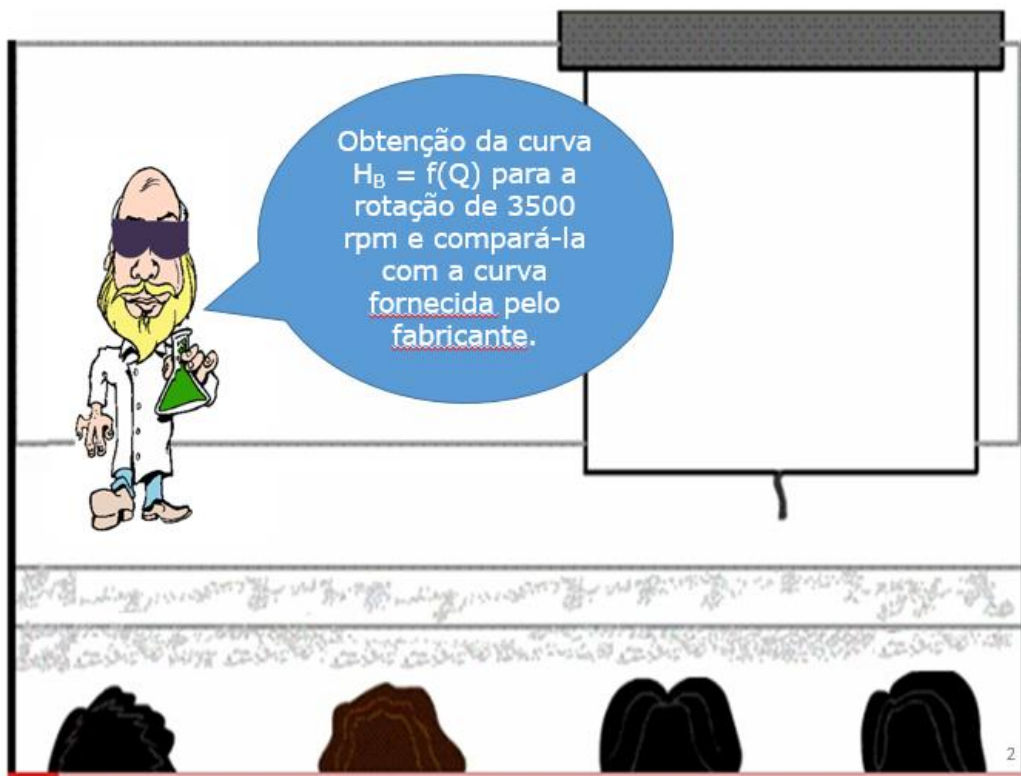




O que acontece com a curva $H_B = f(Q)$ com a variação da rotação?

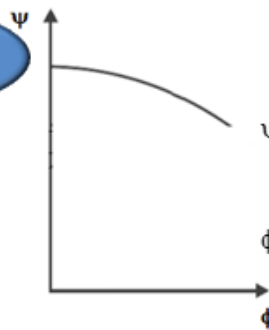


Para responder a esta pergunta evoco o coeficiente manométrico (ψ) e o coeficiente de vazão (ϕ)

$$\psi = \frac{g \times H_B}{n^2 \times D_r^2}; \phi = \frac{Q}{n \times D_r^3}$$



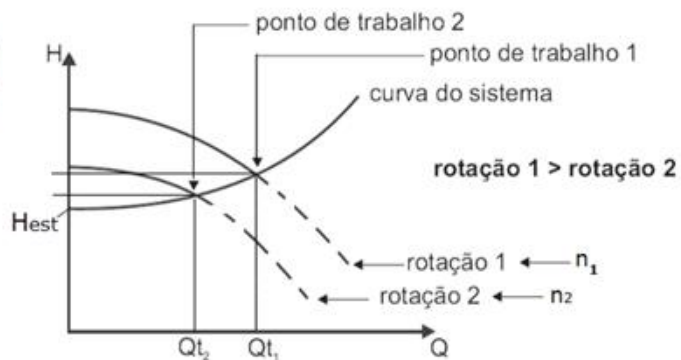
Recordando a curva universal



$$\psi_1 = \psi_2 = \psi = \text{cte} \therefore H_B = \frac{\psi \times n^2 \times D_r^2}{g}$$

$$\phi_1 = \phi_2 = \phi = \text{cte} \therefore Q = \phi \times n \times D_r^3$$

Portanto a rotação n influencia o ponto de trabalho!



Na experiência de bomba, para cada posição da válvula globo, temos:



$$H_e + H_B = H_s$$

$$z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{\alpha_e v_e^2}{2g} + H_B = z_s + \frac{p_s}{\gamma} + \frac{\alpha_s v_s^2}{2g}$$

E lemos a rotação (n_{lida})

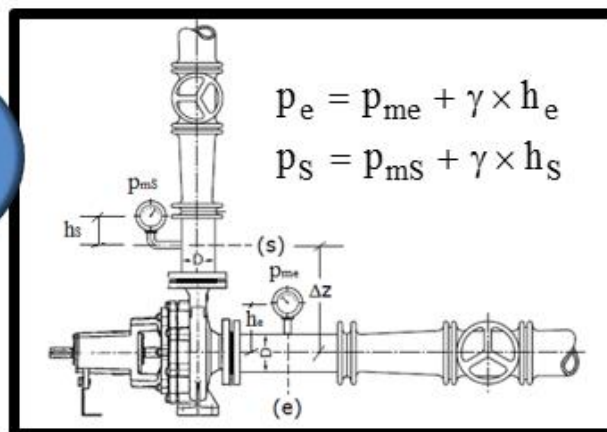




Para a situação descrita ao lado temos:
 $p_e = p_{me} + \gamma \cdot h_e$
 e $p_s = p_{ms}$




Já na situação ao lado ambas as pressões devem ser corrigidas!



8



Determinação da vazão





$Q = \frac{V}{t}$
 $Q = \frac{\Delta h \times A_t}{t}$



Reforçando, para cada vazão lemos a rotação com o auxílio de um tacômetro.



9

Tabela de dados:

Ensaio	P _{me} ()	h _e (mm)	P _{ms} ()	h _s (mm)	Δh (mm)	t (s)	n (rpm)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

10

Como corrigir o HB e a Q para uma rotação n?



$$\phi_{n_{lida}} = \phi_n \rightarrow \frac{Q_{n_{lida}}}{n_{lida}} = \frac{Q_n}{n}$$

$$Q_n = \left(\frac{n}{n_{lida}} \right) \times Q_{n_{lida}}$$

$$\varphi_{n_{lida}} = \varphi_n \rightarrow \frac{H_{Bn_{lida}}}{n_{lida}^2} = \frac{H_{Bn}}{n^2}$$

Recorrendo aos coeficientes de vazão (Φ) e o coeficiente manométrico (Ψ) e impondo as condições de semelhança entre a rotação n e a rotação lida ao longo da experiência



$$H_{Bn} = \left(\frac{n}{n_{lida}} \right)^2 \times H_{Bn_{lida}}$$

11

Tabela de resultados:

Ensaio	Experimental		Fabricante	
	Q_{3500} (m ³ /h)	H_{B3500} (m)	Q_{3500} (m ³ /h)	H_{B3500} (m)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

12

Dados coletados para a bancada 1 do laboratório:

seção	DN (pol)	Dint (mm)	A (cm ²)
entrada	1,5	40,8	13,1
saída	1	26,6	5,57

temp (°F)	$g(m/s^2)$	h_e (cm)	h_s (cm)	Δe_{z-s} (cm)
74	9,8	11,5	9,2	21

	água	Hg	Tanque	
t (°C)	ρ (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)	L ₁ (cm)	L ₂ (cm)
23	997,3	13531	73,8	73,4

ensaio	Pentrada (mmHg)	Psaída (kPa)	Δh (mm)	t(s)	n (rpm)
1	-60	289	0		3515
2	-95	277	50	69	3492
3	-105	265	50	27,57	3462
4	-115	253	100	37,5	3446
5	-125	242	100	31,5	3441
6	-140	229	100	26,87	3438
7	-155	217	100	23,91	3429
8	-195	192	100	20,47	3430

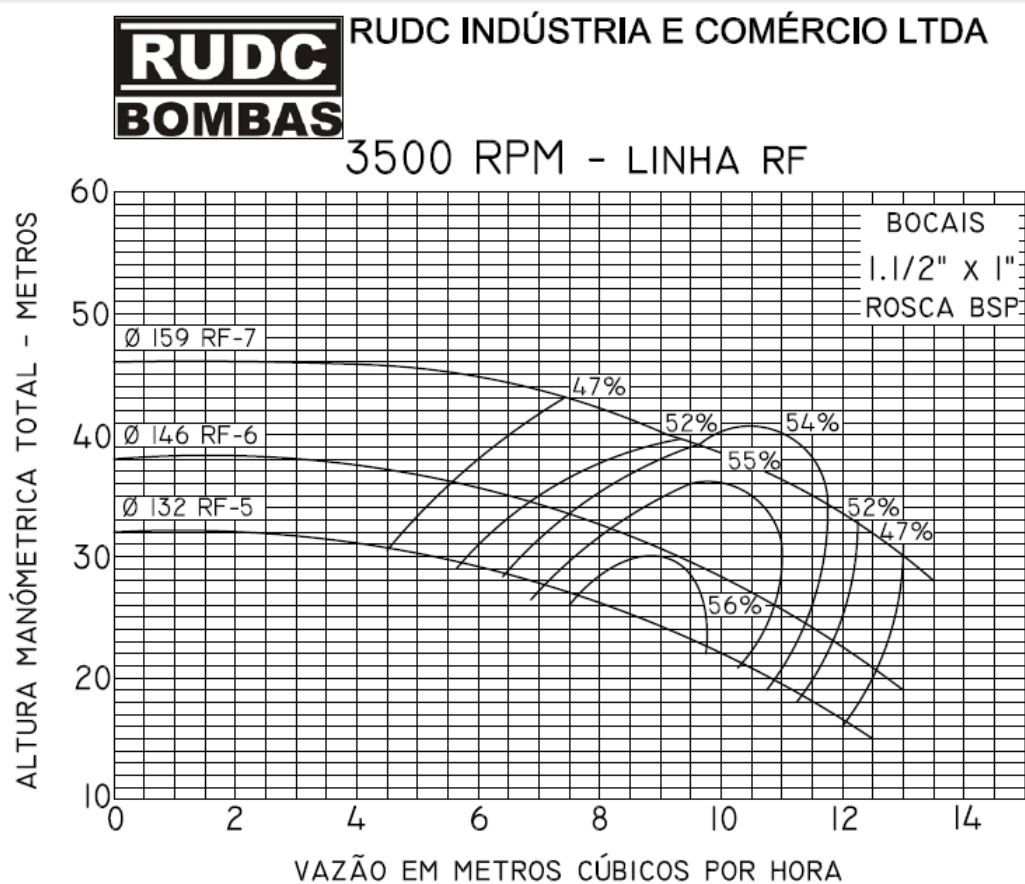
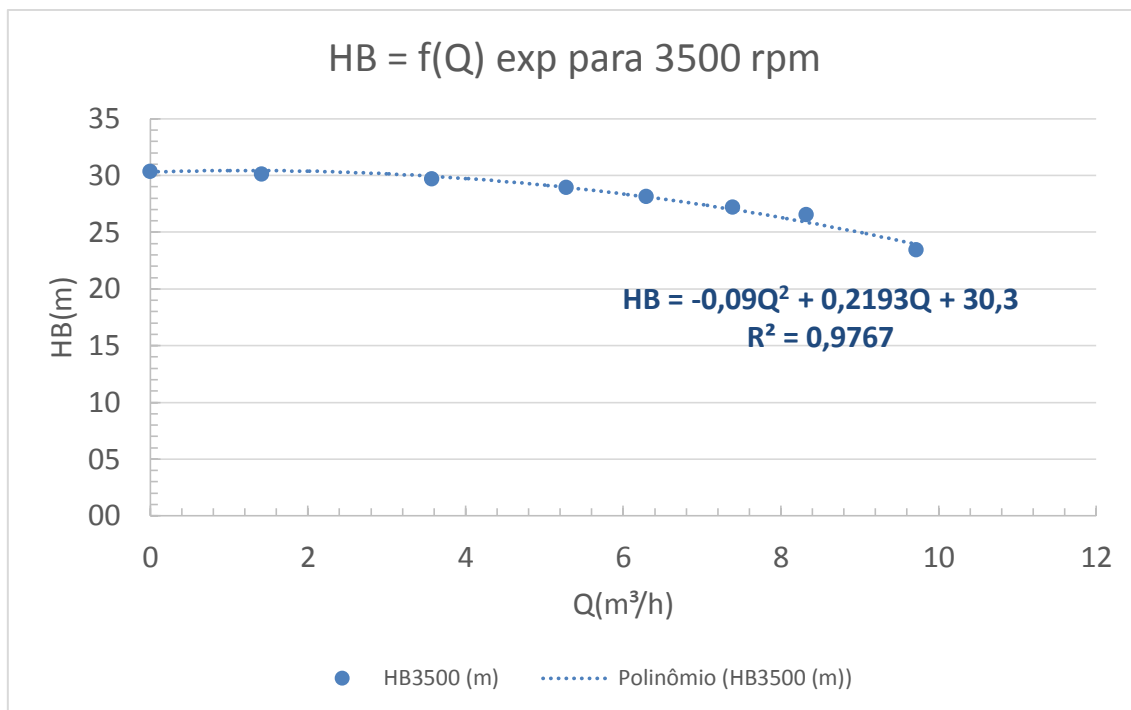
Cálculos:

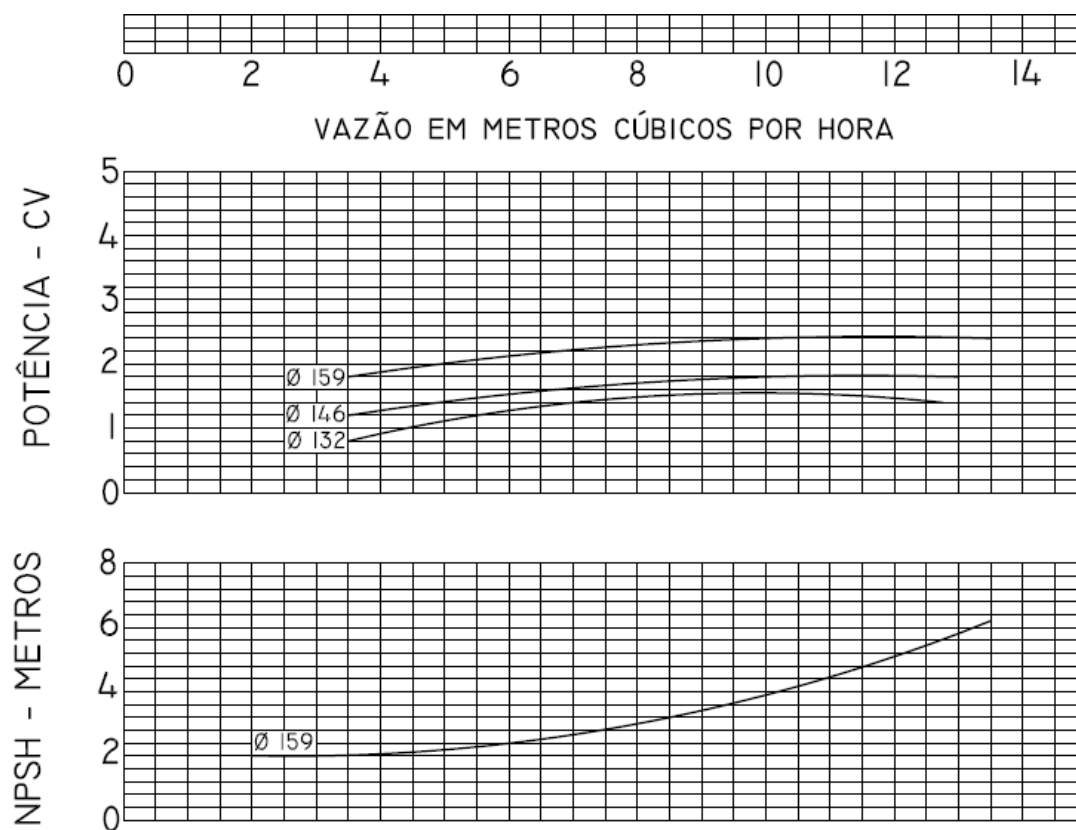
ensaio	Q(m³/s)	Q(m³/h)	p _e (Pa)	p _s (Pa)	ve (m/s)	vs(m/s)	HB(m)
1	0	0	-6872,8	289899,2	0	0	30,6
2	0,000393	1,4	-11537,6	277899,2	0,300	0,705	30,0
3	0,000982	3,5	-12870,4	265899,2	0,750	1,8	29,0
4	0,00144	5,2	-14203,2	253899,2	1,1	2,6	28,0
5	0,00172	6,2	-15536,0	242899,2	1,3	3,1	27,2
6	0,00202	7,3	-17535,2	229899,2	1,5	3,6	26,2
7	0,00227	8,2	-19534,4	217899,2	1,7	4,1	25,4
8	0,00265	9,5	-24865,6	192899,2	2,0	4,8	22,5

Q ₃₅₀₀ (m³/h)	HB ₃₅₀₀ (m)
0	30,3
1,4	30,1
3,6	29,7
5,3	28,9
6,3	28,1
7,4	27,2
8,3	26,5
9,7	23,4

Com esta última tabela e o Excel, podemos traçar a curva da carga manométrica em função da vazão com a bomba operando a 3500 rpm.







Importante observar que a curva da potência foi elaborada considerando a água com massa específica igual a 1000 kg/m^3 .

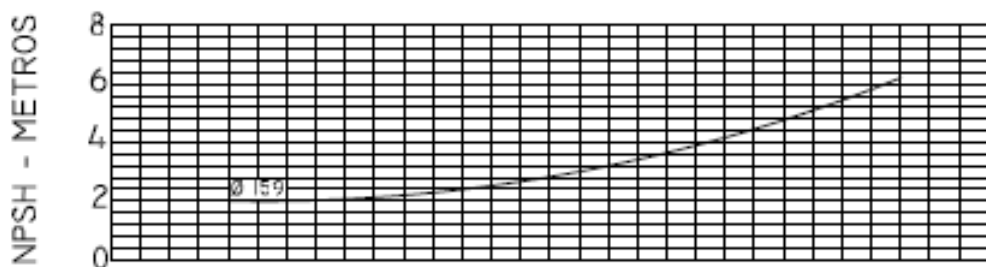
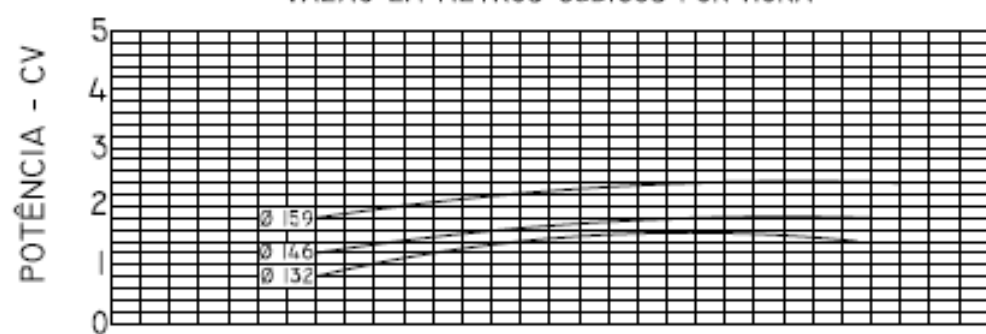
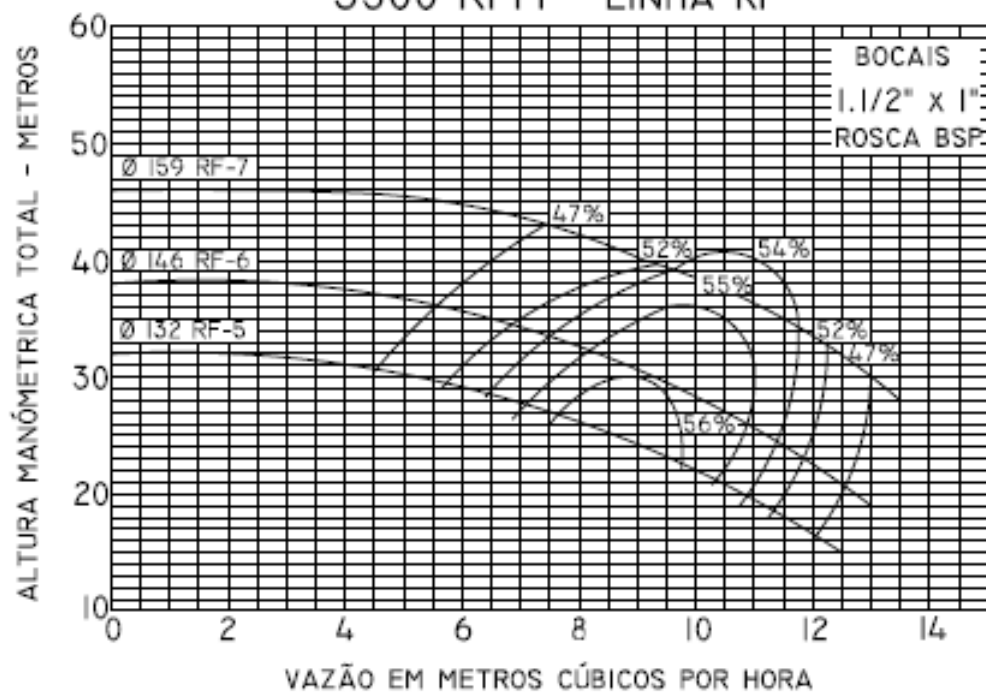
Na página a seguir mostro os três gráficos anteriores juntos, como os mesmos são apresentados pelo fabricante da bomba.





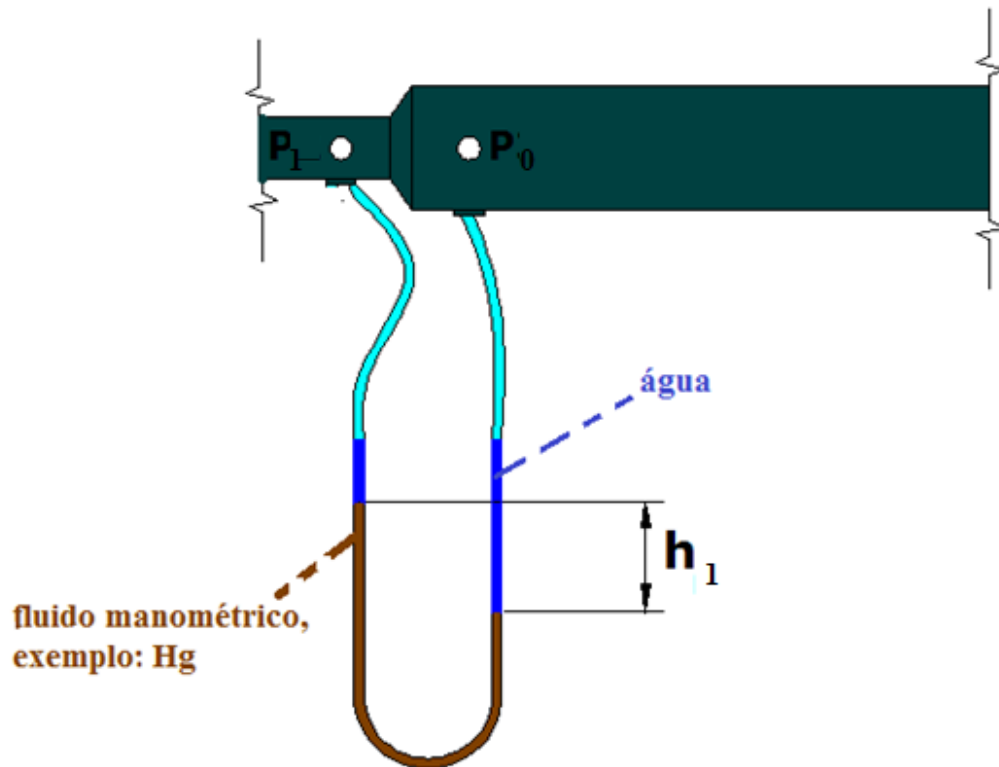
RUDC INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA

3500 RPM - LINHA RF



Bancada 2

Determinar o coeficiente de perda de carga singular (K_S) da redução de 1,5" para 1".



Agora, vamos abordar a experiência de perda de carga singular

$$h_S = K_S \times \frac{v^2}{2g} = K_S \times \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

Exemplos de singularidades



Como calcular as
perdas singulares
(ou localizadas)?



Podemos
também
calculá-las de
duas maneiras:



Para projeto:



$$h_S = K_S \times \frac{v^2}{2g} = K_S \times \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

$K_S \rightarrow$ coeficiente de perda singular ou localizada

$v \rightarrow$ velocidade média do escoamento

$g \rightarrow$ aceleração da gravidade

$Q \rightarrow$ vazão do escoamento

$A \rightarrow$ área da seção formada pelo fluido

Existe outra maneira :

$$h_S = f \times \frac{L_{eq}}{D_H} \times \frac{v^2}{2g}$$

$L_{eq} \rightarrow$ comprimento equivalente $\rightarrow L_{eq} = \frac{K_S \times D_H}{f}$

No laboratório:



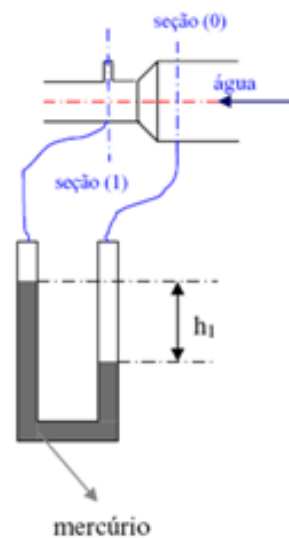
Dados coletados para cada posição da válvula globo controladora de vazão

$\Delta h =$

$t =$

$h_1 =$

temperatura =



Aplica-se a equação da energia de (0) a (1)



$$H_0 = H_1 + H_{p0-1}$$

$$Z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} = Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_{s0-1}$$

$$h_{s0-1} = \frac{p_0 - p_1}{\gamma} + \frac{v_0^2 - v_1^2}{2g} = K_S \times \frac{v_1^2}{2g}$$

$$\therefore K_S = \frac{\frac{p_0 - p_1}{\gamma} + \frac{v_0^2 - v_1^2}{2g}}{\frac{v_1^2}{2g}}$$

Vamos aplicar os dados coletados pela equipe:

$$h_1 = 65\text{mm}$$

$$t = 23^0\text{C}$$

$$\Delta h = 100\text{mm}$$

$$A_{\text{tanque}} = 0,738^2\text{m}^2$$

Cálculos:

$$Q = \frac{\Delta h \times A_t}{t} = \frac{0,1 \times 0,738^2}{21,15} = 2,65 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v_0 = \frac{2,65 \times 10^{-3}}{13,1 \times 10^{-4}} \cong 2,02 \frac{\text{m}}{\text{s}} \rightarrow v_1 = \frac{2,65 \times 10^{-3}}{5,57 \times 10^{-4}} \cong 4,76 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$H_0 = H_1 + h_{S_{\text{red}}}$$

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{1 \times v_0^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{1 \times v_1^2}{2g} + h_{S_{\text{red}}}$$

$$h_{S_{\text{red}}} = \frac{p_0 - p_1}{\gamma} + \frac{v_0^2 - v_1^2}{2g} = \frac{0,065 \times 9,8 \times (13538 - 997,5)}{997,5 \times 9,8} + \frac{2,02^2 - 4,76^2}{19,6}$$

$h_{S_{\text{red}}} \cong -0,131\text{m} \rightarrow$ comprova que existem dados errados, portanto devem ser novamente coletados

Bancada 3

Calcular a carga manométrica da bomba e a perda de carga total antes da bomba para os seguintes dados coletados:

$$p_{m_e} = -220\text{mmHg} \rightarrow h_e = 11,5\text{cm} \rightarrow \text{DN} = 1,5'' \rightarrow \text{aço 40}$$

$$\rightarrow D_{\text{int}} = 40,8\text{mm}; A = 13,1\text{cm}^2$$

$$p_{m_s} = 190\text{kPa} \rightarrow h_s = 9\text{cm} \rightarrow \text{DN} = 1'' \rightarrow \text{aço 40}$$

$$\rightarrow D_{\text{int}} = 26,6\text{mm}; A = 5,57\text{cm}^2$$

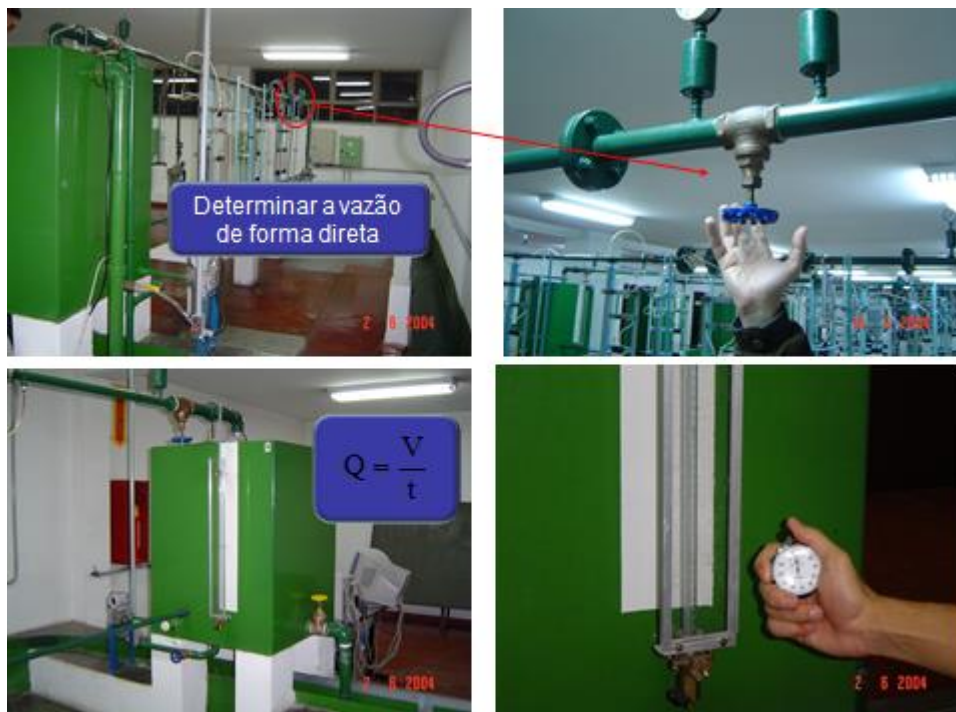
$$\Delta z_{e-s} = 21,5\text{cm}$$

$$\text{em relação ao nível de captação} \rightarrow z_e = 119\text{cm}$$

$$\text{temperatura} = 23^0\text{C}$$

$$A_{\text{tanque}} = 5610\text{cm}^2;$$

$$\Delta h = 100\text{mm} \Rightarrow t = 21,4\text{s}$$



$$Q = \frac{0,1 \times 5610 \times 10^{-4}}{21,4} \cong 2,62 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Determinação da carga manométrica



$$H_{\text{inicial}} + H_B = H_{\text{final}} + H_{p_i-f} \therefore H_{\text{entrada}} + H_B = H_{\text{saida}}$$

não se leva em conta a perda porque ela já é considerada a no rendimento da bomba

$$Z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{v_e^2}{2g} + H_B = Z_s + \frac{p_s}{\gamma} + \frac{v_s^2}{2g}$$

PHR na entrada da bomba

Determinação das cargas potenciais.



Se o mesmo for adotado no eixo da bomba, tem-se:

$$Z_e = 0$$

$$Z_s = \text{medido} = 21,5 \text{ cm}$$

Determinação das cargas de pressão através das leituras das pressões e para isto temos:

- vacuômetro (poderia ser também um manovacuômetro) na seção de entrada = p_{me}
- manômetro na seção de saída = p_{ms}



Cuidado $p_{ms} \neq p_s$



A leitura do aparelho pode ser diferente da pressão que se deseja determinar na seção.

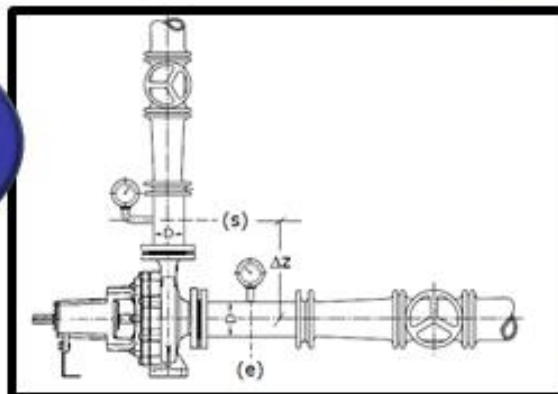
$$p_{\text{seção}} = p_{\text{manométrica}} + \gamma \times h_{\text{correção}}$$

E ela é obtida pelo teorema de Stevin

Para a situação descrita ao lado temos:
 $p_e = p_{me} + \gamma \times h_e$
 e $p_s = p_{ms}$



Já na situação ao lado ambas as pressões devem ser corrigidas!

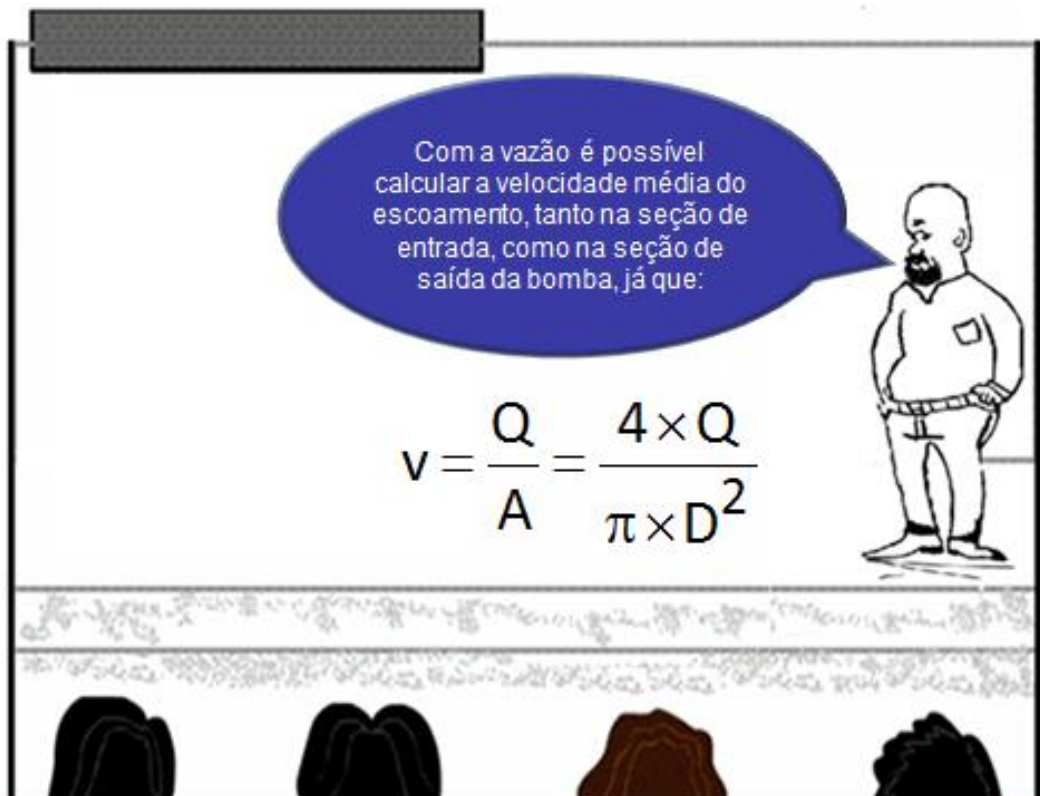


13

Importante salientar que vamos considerar o coeficiente de energia cinética igual a 1,0 ($\alpha = 1,0$), o que resulta:

$$H_B = (Z_s - Z_e) + \left(\frac{p_s - p_e}{\gamma} \right) + \left(\frac{v_s^2 - v_e^2}{2g} \right)$$

E como achamos as velocidades?



Com a vazão é possível calcular a velocidade média do escoamento, tanto na seção de entrada, como na seção de saída da bomba, já que:

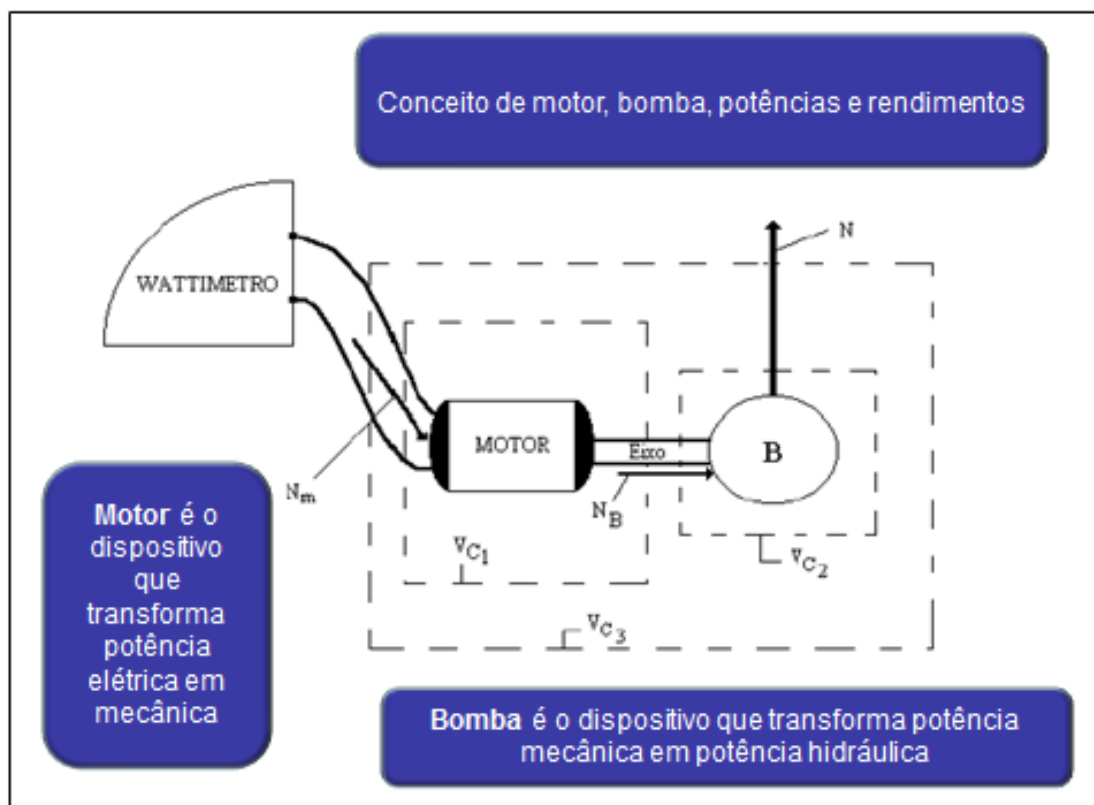
$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4 \times Q}{\pi \times D^2}$$

$$v_s = \frac{Q}{A_s} = \frac{2,62 \times 10^{-3}}{5,57 \times 10^{-4}} \cong 4,7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \rightarrow v_e = \frac{Q}{A_e} = \frac{2,62 \times 10^{-3}}{13,1 \times 10^{-4}} \cong 2,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$H_B = 0,215 + \frac{(190000 + 0,09 \times 997,5 \times 9,8) - (-0,22 \times 13600 \times 9,8 + 0,115 \times 997,5 \times 9,8)}{997,5 \times 9,8} + \frac{4,7^2 - 2^2}{19,6}$$

$$\therefore H_B \cong 23,6\text{m}$$

Vamos refletir sobre potências e rendimentos:



Se a potência mecânica (N_B) for conhecida e a potência hidráulica (N) também, podemos determinar a potência dissipada (perdida) na bomba, pois:

$$N_{\text{dissipada}} = N_B - N = \gamma \times Q \times H_{p\text{bomba}}$$

Conceito de rendimento:

$$\eta_{VC} = \frac{\text{potência que sai}}{\text{potência que entra}} = \frac{\text{potência _ útil}}{\text{potência _ posta _ em _ jogo}}$$

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{N_B}{N_m}$$

$$\eta_{\text{bomba}} = \eta_B = \frac{N}{N_B} = \frac{\gamma \times Q \times H_B}{N_B}$$

$$\eta_{\text{global}} = \frac{N}{N_m} = \frac{\gamma \times Q \times H_B}{N_m}$$

Passamos a calcular a perda de carga total antes da bomba:

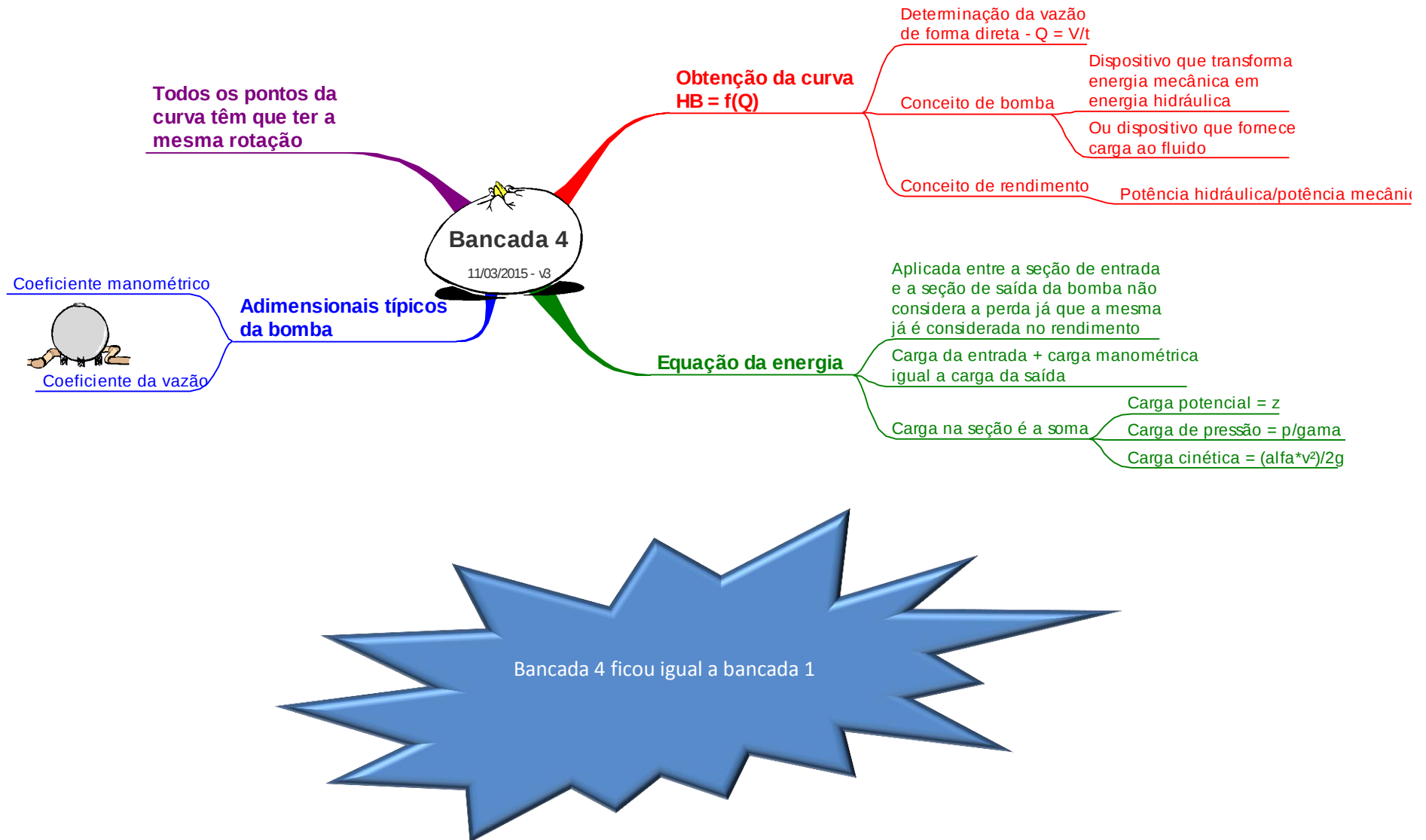
Perda na tubulação antes da bomba.

$$H_{\text{inicial}} = H_e + H_{\text{PaB}}$$

$$z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{v_i^2}{2g} = z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{\alpha_e \times v_e^2}{2g} + H_{\text{PaB}}$$

$$H_{\text{PaB}} = \left[z_e + \left(\frac{p_{me} + \gamma \times h_e}{\gamma} \right) + \frac{\alpha_e \times v_e^2}{2g} \right]$$

$$H_{\text{PaB}} = \left[0,215 + \left(\frac{-0,22 \times 13600 \times 9,8 + 0,115 \times 997,5 \times 9,8}{997,5 \times 9,8} \right) + \frac{1 \times 2^2}{19,6} \right] \cong 2,47\text{m}$$





Comentário: nesse caso é possível somente determinar a perda de carga distribuída de modo teórico e optamos em fazê-lo pela fórmula universal:

$$h_f = f \times \frac{L}{D_H} \times \frac{v^2}{2g} = f \times \frac{L}{D_H} \times \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

Para aplicação da fórmula anterior é necessário a determinação de algumas de suas grandezas, tais como: vazão; comprimento do tubo considerado; coeficiente de perda de carga distribuída; diâmetro hidráulico; área da seção livre.

A vazão será obtida de forma direta:

$$Q = \frac{\Delta h \times A_{\text{tanque}}}{t} = \frac{0,1 \times (0,739 \times 0,745)}{20,84} \cong 2,64 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Como a tubulação é de aço 40 com diâmetro nominal de 1" pela ANSI B3610 temos: $D_{\text{int}} = 26,6 \text{ mm}$; $A = 5,57 \text{ cm}^2$ e $K_{\text{aço}} = 4,6 \text{ e-}5 \text{ m}$

Para a água a 74°F , temos: $t_C = \frac{100}{180} \times (t_F - 32) = \frac{100}{180} \times (74 - 32) \cong 23^\circ\text{C}$ e isto resulta

$$\text{em: } \rho = 997,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; v = 0,934 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}.$$

Determinação do coeficiente de perda de carga distribuída, no caso optamos em recorrer a página:

http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/planejamento_12015/consulta11.htm

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1															
2		propriedades do fluido transportado													
3		temp (°C)		μ (kg/ms)	ρ (kg/m³)	P_v (Pa)									
4		23		9,32E-04	997,5										
5															
6		propriedades do local													
7		g =			m/s²										
8		patm =			Pa										
9															
10															
11		mat. tubo aço													
12			espessura	Dint (mm)	A (cm²)										
13				26,6	5,57										
14															
15			K(m)	DH/k											
16			4,60E-05	578											
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															

FLUIDO (líquido)	Velocidade econômica (m/s)	Material da Tubulação
Água:		
- serviços gerais	0,9 a 2,5	aço

Q	Q(m³/s)	Q(L/s)	Q(L/min)
m³/h	deve transformar para m³/h		
9,5	2,64E-03		

Legenda			
	deve ser preenchida		
	será calculada		
	preenchimento opcional		
	copiado de outra planilha		

Q(m³/h)	v(m/s)	Re	f _{Haaland}	f _{Swamee e Jain}	f _{Churchill}	f _{planilha}	f _{experimental}
9,5	4,74	134984	0,0238	0,0241	0,0241	0,0239	

Portanto:

$$h_f = 0,0241 \times \frac{1,995}{D_H} \times \frac{(2,64 \times 10^{-3})^2}{2 \times 9,8 \times (5,57 \times 10^{-4})^2} \cong 2,1m$$

Obtenha a perda de carga e o coeficiente de perda de carga experimentais para a vazão acima e compare e reflita sobre a comparação. Estime também para esta situação a rugosidade equivalente (K) e compare com o valor tabelado.

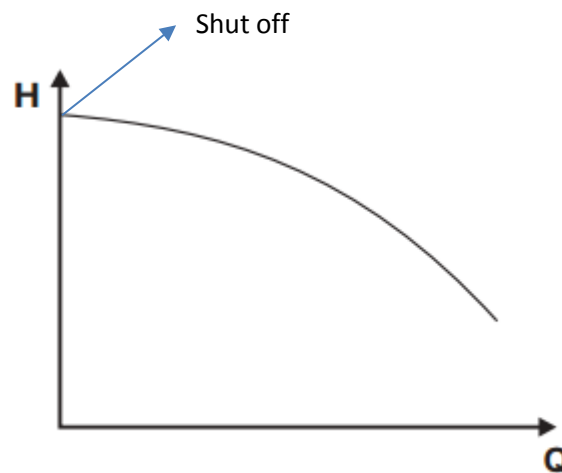


Bancada 6:

Com os dados de HB, determinar para a mesma vazão a H_{est} .

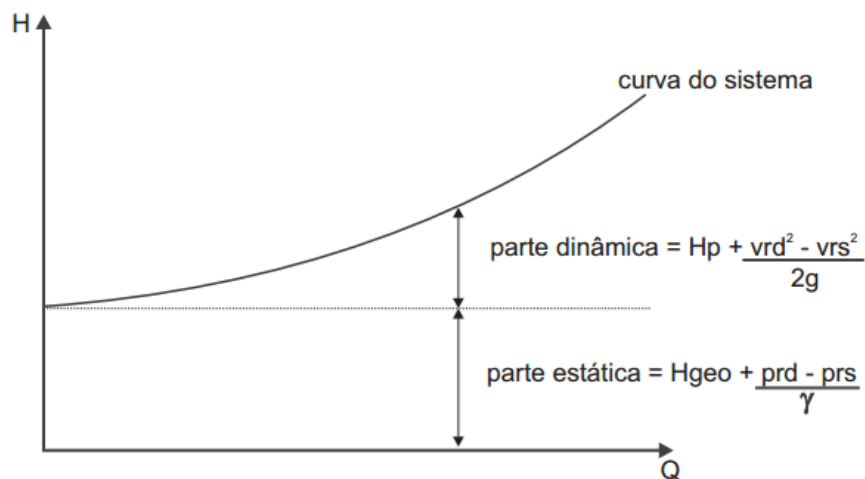
Comentário

A curva característica da bomba (CCB) tem o seu ponto definido para a vazão nula denominado de **shut off**, que indica o maior valor da carga manométrica oferecido pela bomba e o responsável pelo fluido sair da inércia.

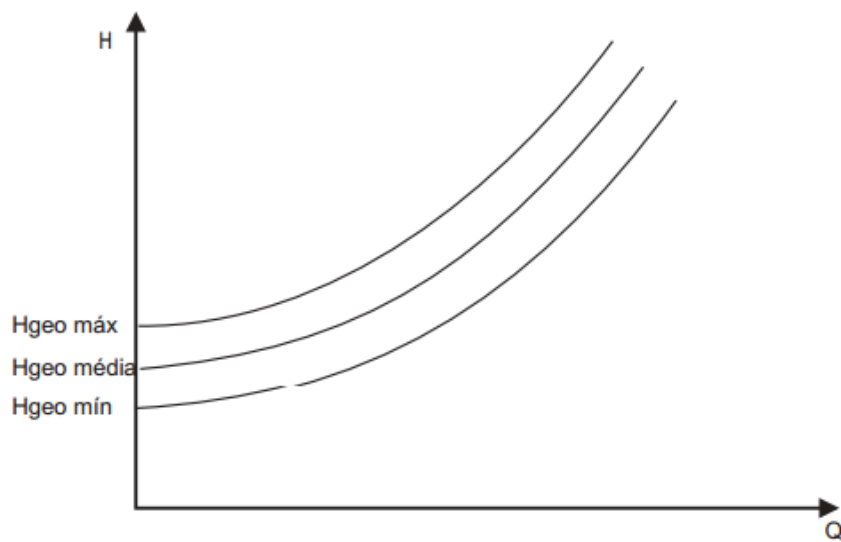
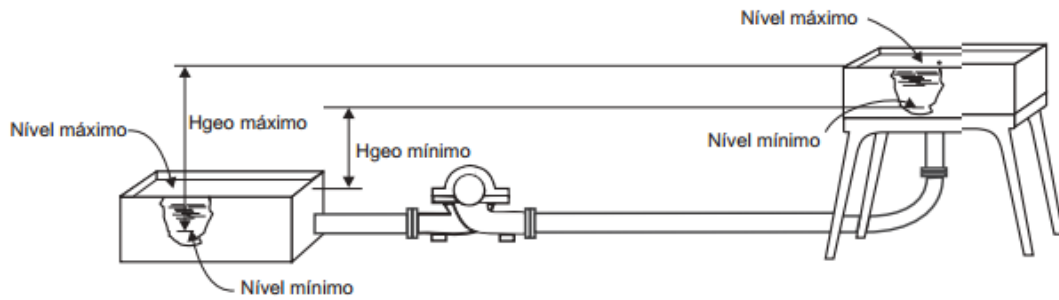


A curva característica da instalação (CCI) tem um ponto para a vazão nula denominado de carga estática e que representa o quanto de carga o fluido necessita receber para deixar a inércia.

$$H_{estática} = H_{est} = (z_{final} - z_{inicial}) + \left(\frac{P_{final} - P_{inicial}}{\gamma} \right)$$



No caso do laboratório podemos ter os níveis variando o que resultaria o representado a seguir:



Na bancada 6 determine tanto o ponto de shut off como as cargas estáticas possíveis!

Bancada 7

Qual a diferença entre a leitura efetuada através do aparelho medidor de vazão eletromagnético (figura A) e a vazão obtida de forma direta (figura B)? Explique em qual delas temos erros.



Figura A



Figura B

$$Q_{\text{medidor_eletromagnético}} = 10,57 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

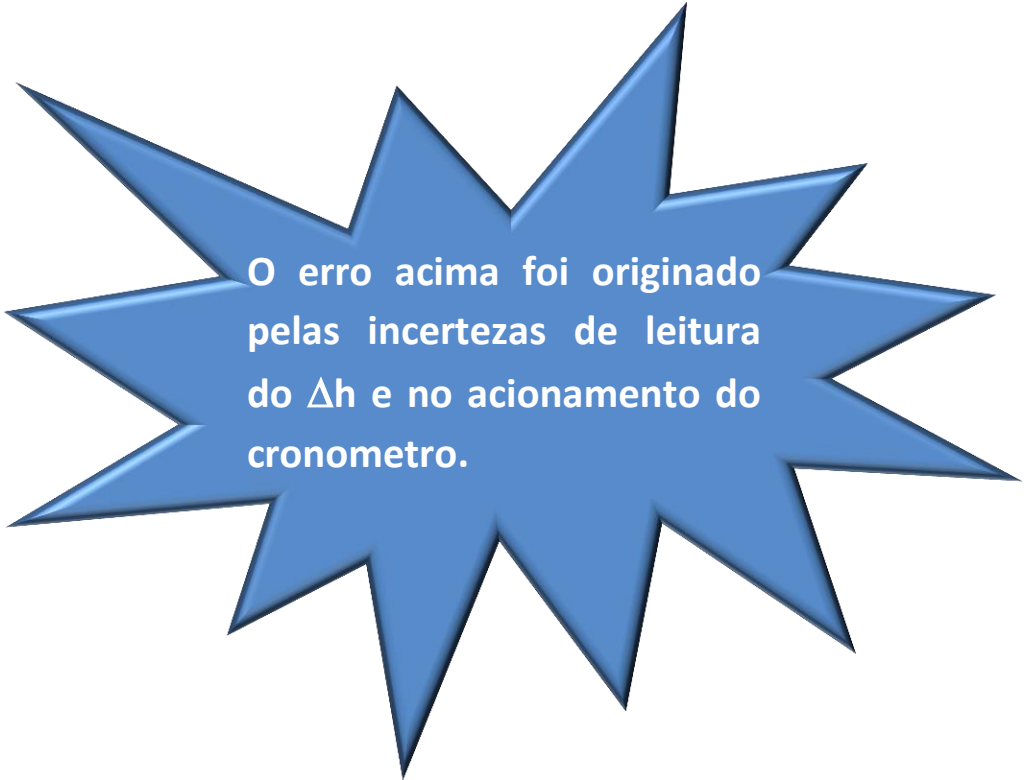
$$Q_{\text{tanque}} = \frac{\Delta h \times A_{\text{tanque}}}{t} = \frac{0,1 \times 0,74^2}{24,18} = 2,26 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 2,26 \times 10^{-3} \times 3600$$

$$Q_{\text{tanque}} = 8,14 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Como o aparelho eletromagnético está calibrado ele é o que registra a vazão correta, portanto ao determinarmos a vazão no tanque estamos cometendo um erro neste caso na ordem de 23%

$$\text{Erro}\% = \frac{10,57 - 8,14}{10,57} \times 100$$

$$\text{Erro}\% \cong 22,7\% \approx 23\%$$



O erro acima foi originado pelas incertezas de leitura do Δh e no acionamento do cronometro.

Bancada 8

Com os dados coletados na bancadas que estão especificados a seguir estime o valor do coeficiente de perda de carga distribuída pelo diagrama de Rouse.

- Tubulação de aço ($4,6 \times 10^{-5} \text{ m}$) com diâmetro nominal de 1" ($D_i = 26,6 \text{ mm} \rightarrow A = 5,57 \text{ cm}^2$)
- Vazão lida no medidor de vazão eletromagnético igual a $11,34 \text{ m}^3/\text{h}$
- Temperatura d'água igual a 23°C , portanto:
 $\rho = 997,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \rightarrow v = 9,34 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

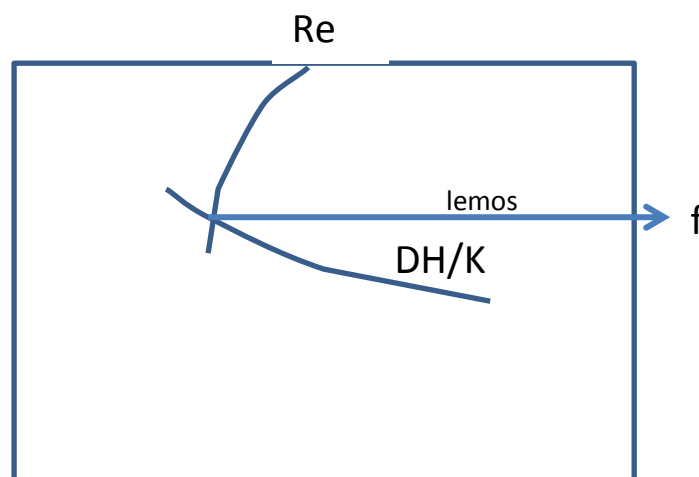
Neste caso o primeiro passo seria calcular a velocidade média do escoamento e em seguida o número de Reynolds.

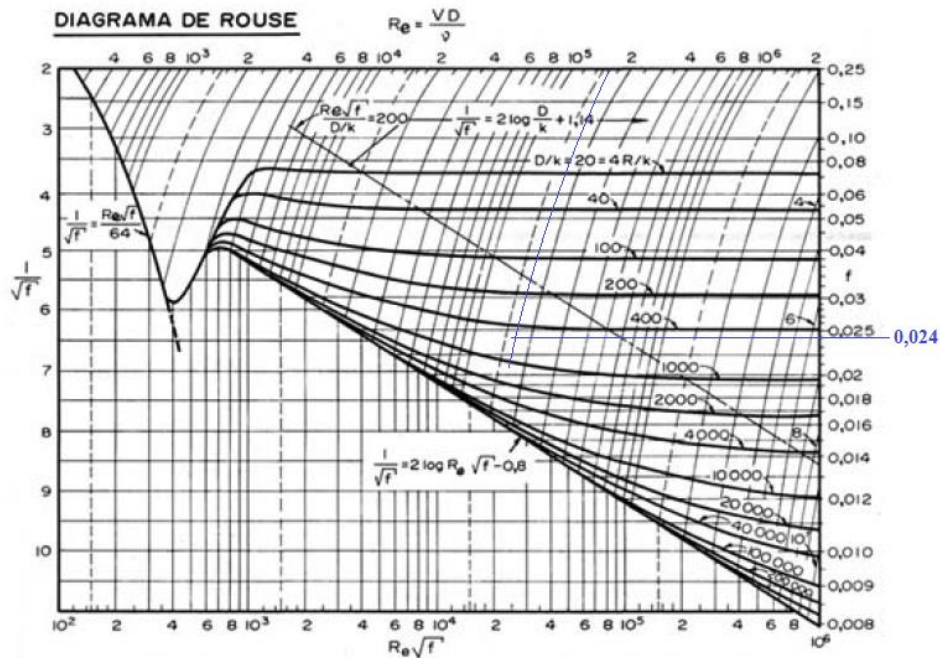
$$v = \frac{Q}{A} = \frac{11,34 / 3600}{5,57 \times 10^{-4}} \cong 5,66 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Re} = \frac{5,66 \times 26,6 \times 10^{-3}}{9,34 \times 10^{-7}} \cong 161194,9 \approx 1,6 \times 10^5$$

Se tivesse dado $\text{Re} \leq 2000$, ou seja, escoamento laminar, teríamos $f = \frac{64}{\text{Re}}$, mas como

o escoamento é turbulento, temos que calcular também $\frac{D_H}{K} = \frac{26,6 \times 10^{-3}}{4,6 \times 10^{-5}} \cong 578$.





Para comprovar a leitura anterior, mostro a seguir a determinação do “f” pela página:

http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/planejamento_12015/consulta11.htm

propriedades do fluido transportado				
temp (°C)	μ (kg/ms)	ρ (kg/m³)	p_v (Pa)	ν (m²/s)
23	9,32E-04	997,5		9,340E-07

propriedades do local	
g =	m/s²
patm =	Pa

mat. tubo aço		
espessura	Dint (mm)	A (cm²)
	26,6	5,57
□		
K(m)	DH/k	
4.60E-05	578	

Q m³/h	Q (m³/s)	Q (L/s)	Q (L/min)	deve transformar para m³/h		
11,34						
Q (m³/h)	v (m/s)	Re	$f_{Haaland}$	$f_{Swamee e Jain}$	$f_{Churchill}$	$f_{planilha}$
11,34	5,66	161061	0,0236	0,0239	0,0239	0,0237

Comparando os resultados constatamos que são próximos.